

O LONGO BRAÇO



Por J. Miguel Rubí

Em um aparente desafio à segunda lei da termodinâmica, a Natureza está cheia de exemplos de ordem emergindo do caos. Uma nova estrutura teórica resolve o aparente paradoxo

A ciência tem dado à humanidade mais que uma cota de decepções. Ela estabelece limites para nossa tecnologia, como a impossibilidade de atingir a velocidade da luz; fracassou em superar nossas vulnerabilidades ao câncer e outras doenças e nos coloca diante de verdades inconvenientes, como a mudança climática mundial. Mas entre todos os desapontamentos, a segunda lei da termodinâmica pode muito bem ser o maior. Ela diz que vivemos em um Universo que está se tornando cada vez mais desordenado, sem que possamos fazer alguma coisa para mudar essa situação. O mero ato de viver contribui para a degeneração do mundo. Independente do avanço de nossas máquinas, elas nunca evitarão completamente o desperdício de alguma energia e o desgaste. Não apenas a segunda lei acaba com o sonho de uma máquina de movimento perpétuo, como sugere que o Cosmos, ao final, esgotará sua energia disponível e adormecerá em êxtase eterno, conhecido como morte térmica.

Ironicamente, a ciência da termodinâmica, da qual a segunda lei é apenas uma parte, data de uma era de otimismo tecnológico. Ocorreu em meados do século 19, quando máquinas a vapor estavam transformando o mundo, e físicos como Rudolf Clausius, Nicolas Sadi Carnot, James Joule e lord Kelvin desenvolviam uma teoria de energia e calor para entender como funcionavam e o que limitava sua eficiência. A partir desse início básico, a termodinâmica tornou-se um dos ramos mais importantes da física e da engenharia. Ela é uma teoria geral de propriedades coletivas de sistemas complexos, não apenas máquinas a vapor, mas também colônias de bactérias, memória de computador, até mesmo buracos negros no Cosmos. De maneira profunda, todos esses sistemas se com-

DA SEGUNDA LEI



portam de forma idêntica. Todos estão se esgotando, de acordo com a segunda lei.

Mas apesar de seu sucesso empírico, a segunda lei sempre parece paradoxal. A proposição de que os sistemas constantemente se esgotam parece entrar em choque com os muitos casos de auto-organização e crescimento na Natureza, e não apenas de desorganização e decadência. Além disso, a derivação original da segunda lei apresenta sérios defeitos teóricos. E a lei, de forma nenhuma deveria se aplicar tão amplamente quanto costuma ser.

Muitos dos cientistas que fundaram a termodinâmica tinham consciência dessas falhas e buscaram formular uma teoria mais completa, uma tarefa que Lars Onsager, Ilya Prigogine, Sybren de Groot, Peter Mazur e outros assumiram no século 20. Mas mesmo a abordagem mais sofisticada deles tinha aplicabilidade limitada. Meus colegas e eu obtivemos recentemente algum progresso em consolidar fundamentos da termodinâmica e estendê-la para novos espaços. Confirmamos que a segunda lei é universal,

mas também descobrimos que não é tão sombria quanto sua reputação sugere.

Fora de Equilíbrio

A termodinâmica é um dos ramos mais incompreendidos da física. Tanto leigos quanto especialistas usam regularmente conceitos como temperatura, pressão e energia sem conhecer seu claro significado e refinadas sutilezas. Mas aqueles entre nós que exploram as profundezas da teoria estão bastante cientes da necessidade de tomar cuidado. O calcanhar-de-aquiles da termodinâmica é que, a rigor, ela se aplica apenas quando o sistema em estudo está em um estado quiescente, chamado de equilíbrio. Nesse estado, os parâmetros do sistema, como massa, energia e forma cessam de mudar. Colocar juntos dois objetos com temperaturas diferentes faz o calor fluir do objeto mais quente para o mais frio. Esse processo se detém quando ambos atingem a mesma temperatura – isto é, quando os dois estão em equilíbrio térmico. Desse ponto em diante, nada muda.

CONCEITOS-CHAVE

- A perda é inevitável – um fato triste da vida quantificado pela famosa segunda lei da termodinâmica. Mas se o mundo está se tornando constantemente mais desordenado, como explicar a auto-organização que ocorre com frequência na Natureza? Na raiz, o problema é que a termodinâmica clássica presume sistemas em equilíbrio, condição plácida que raramente é obtida de fato no mundo real.
- Uma nova abordagem fecha essa brecha e aponta que a segunda lei ainda vale longe do equilíbrio. Mas a evolução da ordem para a desordem pode ser instável, permitindo bolsões de auto-organização.

— Os editores

CUIDADO: CONTEÚDO PODE SER FRIO OU QUENTE

A temperatura parece um conceito simples e universal. As coisas podem estar quentes ou frias, mas elas sempre têm uma temperatura, certo? Não exatamente. É possível atribuir uma temperatura apenas a sistemas (como as moléculas em um copo com água) que estão em uma condição estável conhecida como equilíbrio. À medida que os sistemas se desviam do equilíbrio, a temperatura torna-se progressivamente mais ambígua.

EQUILÍBRIO

Um copo d'água, não perturbado, adquire a temperatura ambiente. As moléculas de água colidem umas com as outras e redistribuem sua energia para que o padrão geral de velocidades se estabilize. Apesar de o copo conter bilhões de bilhões de moléculas, basta apenas um número – a temperatura – para descrever este padrão. A termodinâmica clássica se aplica.



DESVIO MODESTO DE EQUILÍBRIO

O aquecimento da água por baixo perturba o equilíbrio. Mas se o aquecimento é modesto, camadas individuais de água permanecem aproximadamente em equilíbrio – o chamado equilíbrio local – e a água pode ser descrita por um valor de temperatura que aumenta de cima para baixo. A teoria da termodinâmica de não-equilíbrio desenvolvida no século 20 se aplica.



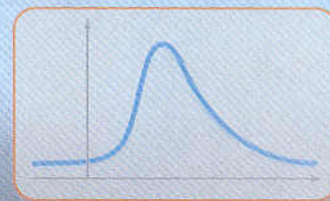
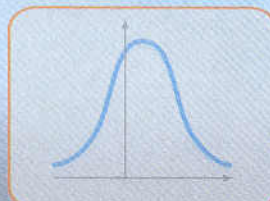
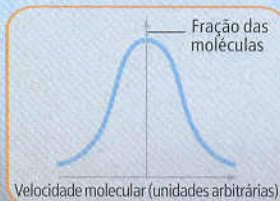
DESVIO SEVERO DO EQUILÍBRIO

Se você aumentar o calor, camadas individuais deixam de estar, mesmo que aproximadamente, em equilíbrio. As moléculas se tornam uma confusão caótica onde o conceito de temperatura deixa de se aplicar. Para descrever o sistema seria preciso introduzir uma grande quantidade de novas variáveis e, no caso mais extremo, especificar as velocidades moleculares uma a uma. Essa situação exige uma nova teoria.



VELOCIDADES MOLECULARES

Alguns livros escolares definem temperatura como a velocidade aleatória média das moléculas. Na verdade, a temperatura é a medida de um padrão inteiro de velocidades. Nos desvios mais modestos do equilíbrio, este padrão apenas muda, mas nos desvios severos, ele é distorcido, deixando a temperatura sem sentido.



Um exemplo comum é quando você coloca gelo em um copo com água. O gelo derrete, e a água no copo atinge uma temperatura uniformemente mais baixa. Mas um mergulho em escala molecular irá revelar uma atividade intensa de moléculas movendo-se freneticamente de um lado para outro e trombando incessantemente umas com as outras. Em equilíbrio, a atividade molecular se organiza de forma que, estatisticamente, o sistema está em repouso; se algumas moléculas aceleram, outras desaceleram, mantendo a distribuição geral de velocidades. A temperatura descreve essa distribuição; de fato, o próprio conceito de temperatura é significativo apenas quando o sistema está em equilíbrio, ou suficientemente perto disso.

Portanto, a termodinâmica lida apenas com situações de imobilidade. O tempo não tem papel nela. Na verdade, é claro, a Natureza nunca está parada e o tempo importa. Tudo está em fluxo constante. O fato de a termodinâmica clássica limitar-se a situações de equilíbrio pode ser uma surpresa. Nas aulas de introdução à física clássica os estudantes aplicam

A SEGUNDA LEI

A segunda lei é a mais conhecida das quatro leis da termodinâmica, o estudo do calor e da energia. Enquanto a primeira lei declara que não se pode obter algo por nada, a segunda lei declara que não se pode nem mesmo obter algo por algo. Quase todos os processos perdem alguma energia na forma de calor, de forma que, para obter algo, é preciso dar algo mais. Esses processos são irreversíveis; desfazê-los exige um custo em energia. Conseqüentemente:

- Os motores são inerentemente limitados em sua eficiência em energia.
- Bombas de calor são mais eficientes que fomalhas, porque elas se movem em vez de gerar calor.
- Apagar a memória do computador é um ato irreversível, de forma que produz calor.

a termodinâmica em sistemas dinâmicos para o cálculo de quantidades como a eficiência em motores de automóvel. Mas essas aplicações têm uma suposição implícita: a de que podemos aproximar um processo dinâmico como sendo uma sucessão idealizada de estados de equilíbrio. Isto é, imaginamos que o sistema está sempre em equilíbrio, apesar de o equilíbrio mudar de um momento para outro. Conseqüentemente, a eficiência que calculamos é apenas um limite máximo. O valor que os motores atingem na prática é um tanto mais baixo, porque eles operam sob condições de não-equilíbrio.

A segunda lei descreve como uma sucessão de estados de equilíbrio pode ser irreversível, de forma que o sistema não possa voltar ao seu estado original sem cobrar um preço de seus arredores. Um cubo de gelo derretido não se refaz espontaneamente; é preciso colocá-lo no freezer, a um determinado custo de energia. Para quantificar essa irreversibilidade, a segunda lei introduz uma quantidade chave: a entropia. A entropia é popularmente descrita como um grau de desordem no sistema, mas como discu-

tirei depois, essa descrição pode ser enganadora. Quantitativamente, a entropia é a quantidade de calor trocada em um processo, dividida pela temperatura. Em um sistema isolado, a entropia sempre permanece a mesma ou aumenta.

Um motor típico, por exemplo, trabalha explorando o fluxo de calor de um reservatório quente para um frio, que são duas grandes massas exteriores ao mecanismo do motor. Se os reservatórios mantivessem uma temperatura constante e as partes do motor não apresentassem atrito, o motor realizaria seu ciclo de uma forma completamente reversível; a entropia total permaneceria constante. Em um motor real essas idealizações não se aplicam, de forma que o ciclo é irreversível e a entropia total aumenta. No final, o motor esgota a energia disponível, o calor deixa de fluir e a entropia atinge um valor máximo. A essa altura, os reservatórios e o motor estão em equilíbrio entre eles e permanecerão dessa forma, inalterados, daí em diante.

O fato de a termodinâmica clássica presumir situações de equilíbrio limita a aplicabilidade da segunda lei. Entropia e temperatura não podem nem mesmo ser definidas, a menos que o sistema esteja em equilíbrio. Além disso, muitos sistemas não podem ser modelados como um motor de automóvel. O Cosmos é um exemplo disso: se o espaço está se expandindo, a entropia pode aumentar sem limite, de forma que o Universo se aproxima mas nunca atinge o equilíbrio (ver *"As origens cósmicas da seta cósmica do tempo"*, por Sean M. Carroll; SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL, julho de 2008). O que esses sistemas têm em comum é que não estão em equilíbrio e nem perto disso.

Ordem a Partir do Caos

Sistemas em não-equilíbrio comportam-se de formas fascinantes, condição que a teoria clássica da termodinâmica não captura e que contraria a idéia de que a Natureza tende a se tornar cada vez mais desordenada. Considere, por exemplo, um aparelho doméstico familiar: a torradeira elétrica. A resistência dentro dela esquenta quando uma corrente passa por ela, porque seu material oferece resistência ao fluxo de elétrons. A segunda lei estipula que esse processo é irreversível: você não pode usar a torradeira para destorrar um pedaço de pão e com isso gerar eletricidade.

Mas é possível fazer algo semelhante. É possível impor uma diferença de temperatura entre as pontas da resistência da torradeira, assegurando que o sistema permaneça fora de equilíbrio. Então ele gerará eletricidade. Essa reversão é a base do termopar, dispositivo usado para medir a temperatura ou produzir energia.

APLICAÇÕES

Muitos processos físicos e bioquímicos importantes operam longe do equilíbrio, onde a teoria padrão da termodinâmica não ousa caminhar. O autor e seus colegas repararam essa falha.

Microfluidos. Os fluidos que se deslocam por canais microscópicos estão sujeitos a efeitos insignificantes em canais maiores, como a difusão de moléculas. As equações-padrão que descrevem o comportamento dos fluidos são freqüentemente intratáveis. Mas a nova teoria da termodinâmica do não-equilíbrio contorna essas complicações e pode prontamente calcular as propriedades básicas do fluxo.

Reações químicas. As reações químicas e outros processos como a cristalização são inerentemente não-lineares: ocorrem apenas quando a energia ultrapassa certo limiar. Elas se tornam ainda mais complexas quando ocorrem em um meio em que densidade e outras propriedades variam. Mas a teoria do não-equilíbrio é capaz de prever as taxas de reação.

Dobramento e desdobramento molecular. Cadeias de aminoácidos se agrupam em proteínas tridimensionais cuja forma ajuda a determinar sua função biológica. O processo é notoriamente pouco entendido. A teoria do não-equilíbrio recentemente teve certo sucesso em problemas relacionados a como as moléculas de RNA se desdobram.

Membranas celulares. As moléculas escapam das membranas celulares auxiliadas por vários dispositivos bioquímicos, como canais de íons e proteínas que atuam como catracas. Mas a velocidade desse processo há muito confunde os teóricos. A teoria do não-equilíbrio mostra que características antes vistas como complicadoras – desvios grandes e prolongados do equilíbrio, assim como não-linearidades e flutuações de densidade – são na verdade essenciais para o processo.

Um fenômeno relacionado a isso é a osmose reversa para dessalinização da água do mar. Na osmose padrão, a diferença na concentração de sal por toda a membrana cria uma diferença na pressão, assegurando que a água flua para o lado mais salino e o dilua. O sistema, portanto, aproxima-se do equilíbrio. Na osmose reversa, uma pressão externa mantém o sistema fora de equilíbrio, forçando a água a fluir para o lado menos salino e se tornando potável.

A torradeira, o termopar, assim como a osmose reversa são processos espelhados. Estão ligados pela chamada relação de reciprocidade, a formulação que valeu a Lars Onsager o Prêmio Nobel de Química de 1968. A simetria entre esses processos reflete a reversibilidade das leis que regem o movimento das partículas do sistema. Essas leis trabalham igualmente bem para a frente ou para trás no tempo. A irreversibilidade que observamos em escala macroscópica só aparece quando consideramos as partículas em massa.

A descoberta da relação de reciprocidade mudou a forma como os físicos pensam o equilíbrio. Eles costumavam considerá-lo como o estado mais ordenado. Apesar de as moléculas poderem estar altamente desordenadas, o sistema no geral está plácido, simétrico e ordenado. Mas a relação de reciprocidade exemplifica como um sistema não equilibrado também pode ser altamente ordenado. As regularidades, simetrias e ilhas de tranqüilidade podem emergir em situações longe do equilíbrio.

Outro exemplo clássico é uma fina camada de fluido aquecida por baixo. O calor flui de baixo para cima, e um gradiente de temperatura se desenvolve por toda a camada. Ao aumentar o gradiente, é possível aumentar o desvio do equilíbrio. Para gradientes modestos, o fluido permanece em repouso. Com gradientes maiores, entretanto, ele começa a se mover. Seu movimento de convecção, longe de ser caótico, é ordenado. Pequenas células hexagonais se formam como se o fluido fosse um cristal. Com gradientes ainda maiores, o movimento se torna turbulento. Esse fenômeno, conhecido como problema de Bénard, demonstra que a ordem pode se transformar em caos e de novo em ordem, à medida que o sistema se desvia do equilíbrio.

Em outro exemplo, um experimentador começa com um fluido em repouso. O fluido é isotrópico: parece o mesmo em todas as direções. O experimentador, então, força o fluido a passar por uma grade de metal a certa velocidade. Apesar de o líquido se tornar turbulento corrente abaixo, seu movimento ainda assim segue em uma única direção. Portanto, o fluido deixa de ser isotrópico. À medida que o experimentador aumenta a velo-



J. Miguel Rubi descreve sua introdução à física como quase acidental. Como estudante, ele quase optou por estudar latim, mas um professor de física inspirador, diz ele, "abriu meus olhos para um mundo fascinante, cheio de princípios e leis que podiam surpreendentemente explicar o que era observado". Hoje, Rubi é professor de física da Universidade de Barcelona, cidade onde nasceu. Em 2003, ele recebeu a medalha Onsager (concedida pela Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia) e o prêmio Alexander von Humboldt (concedido pela fundação de mesmo nome) por sua contribuição à termodinâmica de não-equilíbrio e à teoria dos processos estocásticos.



cidade do fluido, a turbulência cresce e, no final, se torna tamanha que o fluido não mais se desloca em uma direção. A essa altura, o fluido se torna novamente isotrópico. O fluido passou de isotrópico para anisotrópico e de volta a isotrópico – um tipo de progressão de ordem para desordem e retorno à ordem.

A termodinâmica padrão não captura esse fenômeno, limitação que se tornou mais urgente nos últimos anos. Pesquisadores em biologia molecular e do nascente campo da nanotecnologia descobriram uma enorme diversidade de estruturas organizadas, mas em constante mutação, nos sistemas físicos, químicos e biológicos. Para explicá-las é necessária uma teoria de termodinâmica de não-equilíbrio.

Teoria que não se Sustenta

Esforços anteriores para desenvolver essa teoria tiveram início com o conceito dos estados de equilíbrio locais. Apesar de um sistema poder não estar em equilíbrio, partes individuais dele podem estar. Por exemplo, imagine agitar um coquetel com uma espátula. O equilíbrio é perturbado pelo movimento da espátula, mas ainda pode ser encontrado se você procurar atentamente em pequenos bolsões do fluido, que mantêm sua coerência interna. Essas pequenas regiões são capazes de atingir equilíbrio se as forças que atuam no sistema não forem grandes demais e se as propriedades não mudarem demais em pequenas distâncias. Conceitos como temperatura e entropia se aplicam nessas ilhas de equilíbrio, apesar de os valores numéricos dessas quantidades poderem variar de ilha para ilha.

Quando alguém aquece uma das extremidades de uma barra de metal, por exemplo, o calor flui pela barra até a extremidade oposta. A diferença de temperatura entre as extremidades da barra atua como uma força impulsionando o fluxo de calor ao longo da barra. Um fenômeno semelhante ocorre com uma gota de tinta na água. A diferença na concentração da tinta é a força que faz com que ela invada o líquido que a recebe até ele se tornar uniformemente colorido. Essas forças são lineares: o fluxo de calor é proporcional à diferença de temperatura e o fluxo de partículas à diferença de concentração, uma proporção que se mantém mesmo quando as forças que atuam no sistema são fortes. Mesmo em muitos fluxos turbulentos, as tensões internas no fluido são proporcionais aos gradientes de velocidade. Para esses casos, Onsager e outros formularam uma teoria da termodinâmica de não-equilíbrio e mostraram que a segunda lei continuava valendo.

Mas quando essas condições não são atendidas, a teoria não se sustenta. Quando ocorre uma reação química, uma substância repentinamente se

transforma em outra – uma mudança abrupta descrita por uma equação não-linear. Outro tipo de fracasso ocorre quando o sistema é tão pequeno que o amontoado caótico de movimentos moleculares dita seu comportamento e faz com que as propriedades do sistema variem enormemente ao longo de distâncias curtas. Os processos que ocorrem nos pequenos sistemas, como a condensação do vapor de água e o transporte de íons por um canal de proteína em uma membrana celular, são dominados por essas flutuações. Neles, temperatura e entropia deixam de ser quantidades bem definidas. O fracasso das teorias nesses casos também implica fracasso da segunda lei?

Nos últimos anos, eu e meus colegas David Reguera, da Universidade de Barcelona, e José M. G. Vilar, do Sloan-Kettering Institute, estendemos a termodinâmica para esses reinos. Mostramos que muitos dos problemas desaparecem com uma mudança de perspectiva. Nossa percepção da brusquidão depende da escala de tempo que usamos para observar esses processos. Se analisássemos um desses processos químicos aparentemente instantâneos em câmara lenta, veríamos uma transformação gradual, como se estivéssemos assistindo uma porção de manteiga derretendo ao sol. Quando o processo é visto quadro a quadro, as mudanças não são abruptas.

O truque é acompanhar os estágios intermediários da reação usando um novo conjunto de variáveis além daquelas da termodinâmica clássica. No interior dessa estrutura expandida, o sistema permanece em equilíbrio termodinâmico local por todo o processo. Essas variáveis adicionais enriquecem o comportamento do sistema. Elas definem uma paisagem de energia pela qual o sistema passeia como um mochileiro nas montanhas. Vales correspondem a um ponto baixo em energia, às vezes envolvendo caos molecular, outras refletindo ordem molecular. O sistema pode se estabelecer em um vale e então ser levado a outro por forças externas. Se está à beira do caos, pode escapar da desordem e encontrar ordem, ou vice-versa.

A seguir, considere o problema das flutuações. A termodinâmica falha quando os sistemas são excessivamente pequenos? Um exemplo simples mostra que a resposta é negativa. Se jogarmos uma moeda apenas poucas vezes, poderíamos obter por acaso uma seqüência de caras. Mas se jogarmos a moeda muitas vezes, o resultado certamente se aproximará de uma média. A Natureza joga a moeda com frequência. Algumas poucas partículas movendo-se em um recipiente colidem apenas ocasionalmente e podem manter grandes diferenças de velocidade entre elas.

[POR QUE UMA TEORIA DE NÃO-EQUILÍBRIO É NECESSÁRIA]

ORDEM A PARTIR DA DESORDEM

Apesar de as moléculas em um sistema fora de equilíbrio poderem se amontoar irremediavelmente, o sistema pode se tornar ordenado de outras maneiras. A termodinâmica clássica, baseada no equilíbrio, não pode lidar com isso, mas a recém-desenvolvida teoria do não-equilíbrio é capaz disso.

EQUILÍBRIO

Um copo d'água não aquecida, em temperatura ambiente, parece o mesmo em todas as direções, simetria conhecida como isotropia.

DESVIO MODESTO

Um copo de água aquecido por baixo desenvolve um gradiente de temperatura. Se o gradiente for pequeno demais para superar a resistência viscosa ao movimento, o fluido permanece estático.

AUMENTO DO DESVIO

Se o gradiente de temperatura for maior, a água entra em convecção, estabelecendo um padrão regular de células convectivas.

DESVIO SEVERO

A medida que aumenta o aquecimento, o padrão das células de convecção no final se desfaz em um caos turbulento.

DESVIO EXTREMO

A medida que aumenta ainda mais o aquecimento, o caos se torna igualmente distribuído. E o fluido recupera a isotropia perdida.



Mas mesmo em um sistema aparentemente “pequeno”, o número de partículas é muito maior, de forma que as colisões são muito mais frequentes e a velocidade das partículas é reduzida a um valor médio (mesmo que ligeiramente flutuante). Apesar de alguns poucos eventos isolados poderem mostrar comportamento completamente imprevisível, uma série de eventos exibe certa regularidade. Portanto, quantidades como densidade podem flutuar, mas permanecem previsíveis no geral. Por esse motivo, a segunda lei continua a reger o mundo pequeno.

Máquinas a Vapor e Motores Moleculares

O desenvolvimento original da termodinâmica encontrou inspiração no motor a vapor. Atualmente o campo é movido pelos minúsculos motores moleculares dentro das células vivas. Apesar das escalas enormemente diferentes, esses motores compartilham uma função comum: transformam energia em movimento. Por exemplo, as moléculas ATP fornecem o combustível para as moléculas de miosina no tecido muscular se moverem ao longo dos filamentos de actina, puxando as fibras musculares a que estão ligadas. Outros motores são movidos pela luz, por diferenças nas concentrações de prótons ou pelas diferenças de temperatura. A energia química pode guiar íons através de canais em uma membrana celular, de uma região de baixa concentração para uma de alta concentração – precisamente a direção oposta que seguiriam na ausência de um mecanismo ativo de transporte.

A analogia entre máquinas grandes e pequenas é enorme. As flutuações de energia química afetam um motor molecular da mesma forma que uma quantidade aleatória e variável de combustível afeta o pistão de um motor de carro. Portanto, a longa tradição de aplicar a termodinâmica a grandes motores pode ser estendida aos pequenos. Apesar de os físicos disporem de outras ferramentas matemáticas para analisar esses sistemas, a aplicação dessas ferramentas pode ser complicada. As equações de fluxo de fluidos, por exemplo, exigem que os pesquisadores especifiquem precisamente as condições nos limites de um sistema – tarefa hercúlea quando os limites são extremamente irregulares. A termodinâmica fornece um atalho computacional, e já produziu novos discernimentos. Signe Kjelstrup e Dick Bedeaux, ambos da Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, e eu, descobrimos que o calor exerce um papel subestimado no funcionamento dos canais de íons.

Resumindo, meus colegas e eu mostramos que o desenvolvimento da ordem a partir do caos, longe de contradizer a segunda lei, encaixa-se muito bem em uma estrutura mais ampla da termodinâmica. Estamos apenas no limiar do uso desse novo entendimento para aplicações práticas. As máquinas de movimento perpétuo continuam impossíveis, e nós ainda perderemos, no final, a batalha contra a degeneração. Mas a segunda lei não decreta uma degeneração constante. Ela coexiste alegremente com o desenvolvimento espontâneo da ordem e da complexidade. ■

PARA CONHECER MAIS

Non-equilibrium thermodynamics. S. R. de Groot e P. Mazur. Dover, 1984.

Thermodynamics “beyond” local equilibrium. José M. G. Vilar e J. Miguel Rubí, em *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 98, nº 20, págs. 11081-11084; 25 de setembro de 2001. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0110614>

Active transport: kinetic description based on thermodynamic grounds. Signe Kjelstrup, J. Miguel Rubí e Dick Bedeaux, em *Journal of Theoretical Biology*, vol. 234, nº 1, págs. 7-12; 7 de maio de 2008. <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0412493>

The mesoscopic dynamics of thermodynamic systems. David Reguera, J. Miguel Rubí e José M. G. Vilar, em *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 109, nº 46, págs. 21502-21515; 24 de novembro de 2005. <http://arxiv.org/abs/condmat/0511651>